

пени  $u_2 = 4$ , дальнейшее его повышение мало влияет на приведенный момент инерции, что позволяет при его выборе учесть дополнительно другие критерии оптимизации.

Таким образом, выполненное исследование влияния распределения общего передаточного отношения по ступеням механизма на его быстродействие позволяет найти оптимальное решение.

**Выводы.** Для многоступенчатого планетарного механизма  $\overline{AJ} \times \dots \times \overline{AJ}$  выведена формула приведенного момента инерции для общего случая.

Общая формула вычисления приведенного момента инерции исследована для кинематических передач систем управления с модулями, которые были приняты одинаковыми для всех ступеней механизма.

Выполнено исследование влияния числа ступеней механизма на величину приведенного момента инерции. Исследование показало, что, начиная с 3-ей ступени, момент инерции практически не изменяется при любых значениях передаточных отношений ступеней механизма. Этот вывод подтвердил ранее сделанный в работе [6].

Исходя из полученных результатов предложено следующее перераспределение общего передаточного отношения по ступеням механизма:

- на 1-ой ступени следует обеспечить минимально возможное передаточное отношение;
- на 2-ой ступени передаточное отношение следует выбирать в диапазоне 4...5;
- на последующих ступенях передаточные соотношения можно выбирать из технологических соображений одинаковыми.

Создано программное обеспечение оптимального перераспределения общего передаточного отношения многоступенчатого планетарного механизма.

**Список литературы:** 1. Проектирование планетарных механизмов, оптимальных по динамическим характеристикам: Учеб. пособие по курсов. и дипл. проектированию / В.А. Ткаченко, В.Т. Абрамов, М.Д. Коровкин. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1983. – 110с. 2. Ушаков Е.М. Относительный момент инерции зубчатых передач. – “Известия вузов. Машиностроение”. – 1976. – №4. – С.50–55. 3. Кирдяшов Ю.Н., Иванов А.И. Проектирование сложных зубчатых механизмов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 352с. 4. Курсовое проектирование деталей машин / В.Н. Кудрявцев, Ю.А. Державец, И.И. Арефьев и др.; Под общ. ред. В.Н. Кудрявцева: Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 400с. 5. Абрамов В.Т. Определение весовых и инерционных характеристик элементов планетарных механизмов // Теория механизмов и машин. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. – Харьков: Вища школа: Изд-во при Харьк. ун-те, 1982. – Вып. 32. – С.85–87. 6. Абрамов В.Т., Матусевич В.А., Шехов А.В. Оптимизация параметров планетарных механизмов по критерию быстродействия // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – 2007. – Вип. 21. – С.45–52.

Поступила в редколлегию 25.05.08

УДК 621.833.6

**О.Ю. КЛАДОВА**, доц., канд.техн.наук,  
**И.Г. ШЕБАНОВ**, проф., канд.техн.наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

## ОБ АНАЛОГАХ БИПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ И ПАРНО-ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ОДНИМ САТЕЛЛИТНЫМ ПЛАНЕТАРНЫМ МЕХАНИЗМОМ

Пропонується використання аналогів за загальним передаточним відношенням біпланетарних та парно-планетарних механізмів, завдяки їх перевагам, в механічних авіаційних пристроях.

Using of biplanet and pair-planetary gears analogs (with similar transmission ratio) in view of their advantages is presented.

**Постановка проблемы.** Всё больше распространение в технике получают разработка и изготовление различных типов сложных планетарных механизмов, в связи с этим большое значение приобретает рациональность их строения и область использования.

**Анализ литературы.** В работах [1, 2, 3] установлены условия эквивалентности некоторых замкнутых планетарных зубчатых механизмов и планетарных зубчатых механизмов с парными сателлитами.

Вместе с тем ещё не определены возможные аналоги бипланетарных и парно-планетарных зубчатых механизмов, их достоинства и область использования.

**Цель статьи.** Рассмотрение образования аналогов бипланетарных механизмов и парно-планетарных механизмов (с одним сателлитным планетарным механизмом), их достоинств, формирование рекомендаций по практическому применению.

1. **Аналоги бипланетарных зубчатых механизмов.** Пусть имеем бипланетарный зубчатый механизм [4] типа А-АI-I (рис. 1, а). Преобразуем его в замкнутый планетарный механизм АI-(АI)-Н (рис. 1, б), для этого ликвидируем сателлитный планетарный механизм (рис. 1, а) и используем его колёса  $Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$  для формирования замыкающей части механизма АI-(АI)-Н.

Выражения общих передаточных отношений  $i_{IH}$  механизмов АI-(АI)-Н и АI-(АI)-Н имеют вид [4]

$$i_{IH}^{(A-AI-I)} = 1 - i_{14}^{(H)} = 1 - (1 - i_{1H}^{(4)})i_{5H} = i_{1H}^{(4)} + (1 - i_{1H}^{(4)})i_{58}^{(H)} = 1 + \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_2 Z_4 Z_6 Z_8}{Z_1 Z_3 Z_5 Z_7}; \quad (1)$$

$$i_{IH}^{(AI-(AI)-H)} = i_{18} = i_{18}^{(4)} + i_{18}^{(H)} = i_{1H}^{(4)} + (1 - i_{1H}^{(4)})i_{58} = 1 + \frac{Z_2 Z_4}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_2 Z_4 Z_6 Z_8}{Z_1 Z_3 Z_5 Z_7}. \quad (2)$$

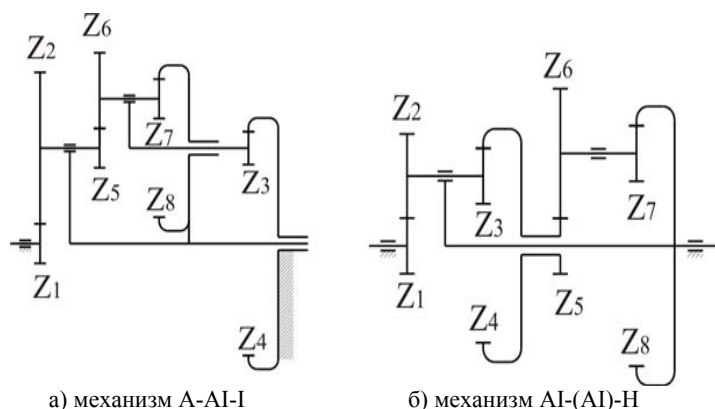


Рис. 1

Таким образом, синтезирован замкнутый планетарный механизм АI-(АI)-H с таким же выражением общего передаточного отношения  $i_{IH}$ , что и у бипланетарного механизма А-АI-I.

При одинаковых числах зубьев одноимённых колёс механизмов

$$\frac{i_{IH}}{(AI-(AI)-H)} = \frac{i_{IH}}{(A-AI-I)}, \quad (3)$$

то есть механизм АI-(АI)-H является аналогом механизма А-АI-I по общему передаточному отношению.

Аналог имеет более простую кинематическую схему, в его замкнутом контуре отсутствует циркулирующая мощность ( $i_{18}^{(4)} > 0, i_{18}^{(H)} > 0$ )<sup>1</sup>.

Анализ относительных скоростей сателлитов и переборов (таблица 1) также свидетельствуют о преимуществах аналога.

Таблица 1.

Относительные угловые скорости сателлитов и переборов

Механизм А-АI-I	Механизм АI-(АI)-H
$\omega_{2H} = -i_{5h}^{(H)} i_{34}^{(H)} \omega_H =$ $= -\frac{Z_4}{Z_3} \left(1 + \frac{Z_6 Z_8}{Z_5 Z_7}\right) \omega_H$	$\omega_{2H} = -i_{5h}^{(H)} i_{34}^{(H)} \omega_H =$ $= -\frac{Z_4}{Z_3} \left(1 + \frac{Z_6 Z_8}{Z_5 Z_7}\right) \omega_H$
$\omega_{6h} = i_{78}^{(h)} i_{34}^{(H)} \omega_H =$ $= \frac{Z_8 Z_4}{Z_7 Z_3} \omega_H$	$\omega_6 = i_{78} \omega_H = \frac{Z_8}{Z_7} \omega_H$

<sup>1</sup> Циркулирующая мощность в замкнутых контурах бипланетарных механизмов почти всегда присутствует [1].

Достоинство аналога определяют ограничения на использование бипланетарного зубчатого механизма для редукции или мультипликации только случаями, сопряженными с формированием сложных траекторий точек сателлитов.

Возможные аналоги бипланетарных механизмов по общему передаточному отношению  $i_{IH}$  приведены в таблице 2 [5].

Таблица 2 позволяет выбрать для редукции или мультипликации рациональный аналог бипланетарного механизма, т.е. такой, в замкнутом контуре которого отсутствует циркулирующая мощность.

Таблица 2.

№№ п.п	Тип бипланетарного механизма	Тип аналога бипланетарного механизма по общему передаточному отношению $i_{IH}$	Наличие циркулирующей мощности в замкнутом контуре аналога
1	2	3	4
1	A-AI-A	AA-(AI)-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
2	A-AI-I	AI-(AI)-H	Ц.м. нет
3	I-AI-A	IA-(AI)-H	Ц.м. нет
4	I-AI-I	II-(AI)-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
5	A- $\overline{AI}$ -A	AA-( $\overline{AI}$ )-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
6	A- $\overline{AI}$ -I	AI-( $\overline{AI}$ )-H	Ц.м. нет
7	I- $\overline{AI}$ -A	IA-( $\overline{AI}$ )-H	Ц.м. нет
8	I- $\overline{AI}$ -I	II-( $\overline{AI}$ )-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
9	A-AA-A	AA-(AA)-H	Ц.м. нет при $0 < i_{IH}^{(4)} < 1$
10	A-AA-I	AI-(AA)-H	Ц.м. есть
11	I-AA-A	IA-(AA)-H	Ц.м. есть
12	I-AA-I	II-(AA)-H	Ц.м. нет при $0 < i_{IH}^{(4)} < 1$
13	A-II-A	AA-(II)-H	Ц.м. нет при $0 < i_{IH}^{(4)} < 1$
14	A-II-I	AI-(II)-H	Ц.м. есть
15	I-II-A	IA-(II)-H	Ц.м. есть
16	I-II-I	II-(II)-H	Ц.м. нет при $0 < i_{IH}^{(4)} < 1$
17	A-IA-A	AA-(IA)-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
18	A-IA-I	AI-(IA)-H	Ц.м. нет

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4
19	I-IA-A	IA-(IA)-H	Ц.м. нет
20	I-IA-I	II-(IA)-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
21	A- $\overline{IA}$ -A	AA-( $\overline{IA}$ )-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$
22	A- $\overline{IA}$ -I	AI-( $\overline{IA}$ )-H	Ц.м. нет
23	I- $\overline{IA}$ -A	IA-( $\overline{IA}$ )-H	Ц.м. нет
24	I-IA- $\overline{I}$	II-( $\overline{IA}$ )-H	Ц.м. нет при $i_{IH}^{(4)} < 0$

Среди рациональных аналогов наибольшее общее передаточное отношение  $i_{IH}$  имеют механизмы типа AA-(AI)-H, AI-(AI)-H, AA-( $\overline{AI}$ )-H, AI-( $\overline{AI}$ )-H.

## 2. Аналоги парно-планетарных зубчатых механизмов с одним сателлитным планетарным механизмом

### 2.1 Парно-планетарные зубчатые механизмы с левым блоком парного сателлита в виде сателлитного планетарного механизма.

Пусть имеем механизм типа 2AxAI(л)-AA (рис. 2, а). Преобразуем его в замкнутый планетарный механизм типа AI-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub> (рис. 2, б).

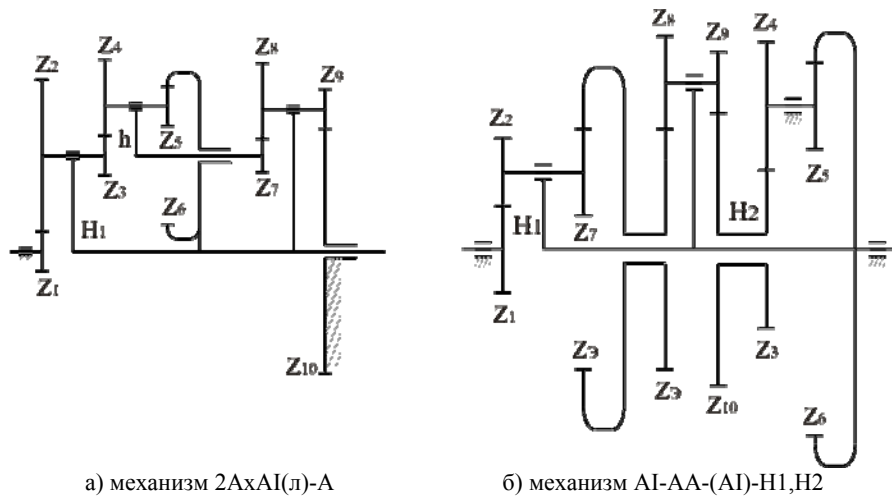


Рис. 2

Для этого введем между колёсами  $Z_7$ - $Z_8$ , соединяющими блоки парного сателлита, дополнительное центральное звено с одинаковыми числами зубьев  $Z_3$  колес с сохранением знака  $i_{78}$  (рис. 2,б), а также ликвидируем сателлитный планетарный механизм (рис. 2,а) и используем его колёса  $Z_3$   $Z_4$   $Z_5$   $Z_6$  для формирования замыкающей части замкнутого контура  $Z_2$ - $Z_7$ - $Z_3$ - $Z_5$ - $Z_8$ - $Z_9$ - $Z_{10}$ - $Z_3$ - $Z_4$ - $Z_5$ - $Z_6$ - $Z_1$  механизма AI-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>

Выражения общих передаточных отношений  $i_{IH}$  механизмов 2AxAI(л)-AA и AI-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub> имеют вид

$$i_{IH}^{(2AxAI(л)AA)} = i_{IH} = 1 - i_{1,10}^{(H)} = 1 - i_{1,2}^{(H)} i_{2,3}^{(H)} i_{3,4}^{(H)} i_{4,5}^{(H)} i_{5,6}^{(H)} i_{6,7}^{(H)} i_{7,8}^{(H)} i_{8,9}^{(H)} i_{9,10}^{(H)} = 1 + \frac{Z_2 Z_8 Z_{10}}{Z_1 Z_7 Z_9} + \frac{Z_2 Z_8 Z_{10} Z_4 Z_6}{Z_1 Z_7 Z_9 Z_3 Z_5}; \quad (4)$$

$$i_{IH}^{AI-AA-(AI)-H_1,H_2} = i_{I6} = i_{I6}^{(\ominus)} + i_{I6}^{(H_1,10)} + i_{I6}^{(H_1,H_2)} = i_{IH_1}^{(\ominus)} + i_{I9}^{(H_1)} i_{9H_2}^{(10)} + i_{I9}^{(H_1)} i_{9H_2}^{(10)} + i_{I36}^{(H_1)} i_{36}^{(H_2)} = \frac{Z_2 Z_9}{Z_1 Z_7} - \frac{Z_2 Z_9}{Z_1 Z_7} \left(1 - \frac{Z_8 Z_{10}}{Z_3 Z_5}\right) + \frac{Z_2 Z_9 Z_8 Z_{10} Z_4 Z_6}{Z_1 Z_7 Z_9 Z_3 Z_5} = 1 + \frac{Z_2 Z_8 Z_{10}}{Z_1 Z_7 Z_9} + \frac{Z_2 Z_8 Z_{10} Z_4 Z_6}{Z_1 Z_7 Z_9 Z_3 Z_5}. \quad (5)$$

Таким образом, синтезирован замкнутый планетарный зубчатый механизм с двумя замкнутыми контурами: малым  $Z_7 - Z_9 - Z_3 - Z_8 - H_2 - H_7$  и большим  $Z_7 - Z_9 - Z_3 - Z_8 - Z_9 - Z_{10} - Z_3 - Z_4 - Z_5 - Z_6 - H_1$ .

Выражение общего передаточного отношения  $i_{IH}$  у замкнутого планетарного механизма такое же, как и у парно-планетарного.

При одинаковых числах зубьев одноименных колёс механизмов

$$i_{IH}^{AI-AA-(AI)-H_1,H_2} = i_{IH}^{2AxAI(л)-AA}. \quad (6)$$

То есть, механизм AI-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub> является аналогом механизма 2AxAI(л)-AA по общему передаточному отношению  $i_{IH}$ .

Аналог, несмотря на увеличение числа звеньев, имеет более простую кинематическую схему. В замкнутых контурах при  $i_{9H_2}^{(10)} < 0$  отсутствует циркулирующая мощность ( $i_{I6}^{(\ominus)} > 0; i_{I6}^{(H_1,10)} > 0; i_{I6}^{(H_1,H_2)} > 0$ ).

Выражения для определения относительных угловых скоростей сателлитов и переборков представлены в таблице 3.

Достоинства аналога определяют ограничения на использование парно-планетарного зубчатого механизма с левым блоком парного сателлита в виде сателлитного планетарного механизма для редукции или мультипликации только случаями, сопряженными с формированием сложных траекторий точек сателлитов.

Таблица 3.

Относительные угловые скорости спутников и переборов

Механизм 2АхАІ(л)-АА	механизм АІ-АА-(АІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>
$\omega_{2H} = -i_{3h}^{(6)} i_{7,10}^{(H_2)} \omega_H = -\frac{Z_8 Z_{10}}{Z_7 Z_9} (1 + \frac{Z_4 Z_6}{Z_3 Z_5}) \omega_H$	$\omega_{2H} = i_{23}^{(H)} i_{5,10}^{(H)} (i_{36} - 1) \omega_H = -\frac{Z_8 Z_{10}}{Z_7 Z_9} (1 + \frac{Z_4 Z_6}{Z_3 Z_5}) \omega_H$
$\omega_{4h} = i_{46}^h i_{7,10}^{(H_2)} \omega_H = \frac{Z_6 Z_8 Z_{10}}{Z_5 Z_7 Z_9} \omega_H$	$\omega_5 = i_{56} \omega_H = \frac{Z_6}{Z_5} \omega_H$
$\omega_{8,H_2} = -i_{8,10}^{(H_2)} \omega_{H_2} = \frac{Z_{10}}{Z_9} \omega_H$	$\omega_{8,H_2} = i_{8,10}^{(H_2)} (i_{36} - 1) \omega_H = \frac{Z_{10}}{Z_9} (1 + \frac{Z_4 Z_6}{Z_3 Z_5}) \omega_H$

Другие аналоги парно-планетарных механизмов с левым блоком парного спутника в виде спутникового планетарного механизма приведены в таблице 4.

Таблица 4.

№ п.п.	Тип парно-планетарного механизма	Тип аналога парно-планетарного механизма по общему передаточному отношению	Наличие циркулирующей мощности в малом замкнутом контуре	Наличие циркулирующей мощности в большом замкнутом контуре
1	2	3	4	5
1	2АхАІ(л)-АА	АІ-АА-(АІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. нет
2	2АхАІ(л)-АІ	АІ-АІ-(АІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. есть	Ц.м. есть
3	2АхАІ(л)-ІА	ІІ-АА-(АІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$ ; $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$
4	2АхАІ(л)-ІІ	ІІ-АІ-(АІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$
5	2Ах $\overline{АІ}$ (л)-АА	АІ-АА-( $\overline{АІ}$ )-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. нет
6	2Ах $\overline{АІ}$ (л)-АІ	АІ-АІ-( $\overline{АІ}$ )-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. есть	Ц.м. есть
7	2Ах $\overline{АІ}$ (л)-ІА	ІІ-АА-( $\overline{АІ}$ )-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$ ; $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$
8	2Ах $\overline{АІ}$ (л)-ІІ	ІІ-АІ-( $\overline{АІ}$ )-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5
9	2АхАА(л)-АА	АІ-АА-(АА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. есть
10	2АхАА(л)-АІ	АІ-АІ-(АА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. есть	Ц.м. нет
11	2Ах-АА(л)-ІА	ІІ-АА-(АА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 1$ ; $0 < i_{1H_2}^{(10)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 1$
12	2АхАА(л)-ІІ	ІІ-АІ-(АА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} > 0$ ;	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} > 0$
13	2АхІІ(л)-АА	АІ-АА-(ІІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. есть
14	2АхІІ(л)-АІ	АІ-АІ-(ІІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. есть	Ц.м. нет
15	2АхІІ(л)-ІА	ІІ-АА-(ІІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 1$ ; $0 < i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 1$ ;
16	2АхІІ(л)-ІІ	ІІ-АІ-(ІІ)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} > 0$ ;	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$
17	2АхІА(л)-АА	АІ-АА-(ІА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. нет
18	2АхІА (л)-АІ	АІ-АІ-(ІА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. есть	Ц.м. есть
19	2АхІА (л)-ІА	ІІ-АА-(ІА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$ ; $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 0$
20	2АхІА (л)-ІІ	ІІ-АІ-(ІА)-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\mathcal{E})} < 1$
21	2Ах $\overline{ІА}$ (л)-АА	АІ-АА-( $\overline{ІА}$ )-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. нет при $i_{\mathcal{E}H_2}^{(10)} < 0$	Ц.м. нет
22	2Ах $\overline{ІА}$ (л)-АІ	АІ-АІ-( $\overline{ІА}$ )-Н <sub>1</sub> ,Н <sub>2</sub>	Ц.м. есть	Ц.м. есть

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5
23	2Ax $\overline{IA}$ (л)-IA	II-AA-( $\overline{IA}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$ ; $i_{\Sigma H_2}^{(\ominus)} > 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
24	2Ax $\overline{IA}$ (л)-II	II-AI-( $\overline{IA}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
25	2IxAI (л)-AA	AA-AA-(AI)-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$ ; $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
26	2IxAI (л)-AI	AA-AI-(AI)-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
27	2IxAI (л)-IA	IA-AA-(AI)-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет
28	2IxAI (л)-II	IA-AI-(AI)-H1,H2	Ц.м. есть	Ц.м. есть
29	2Ix $\overline{AI}$ (л)-AA	AA-AA-( $\overline{AI}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$ ; $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
30	2Ix $\overline{AI}$ (л)-AI	AA-AI-( $\overline{AI}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
31	2Ix $\overline{AI}$ (л)-IA	IA-AA-( $\overline{AI}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет
32	2Ix $\overline{AI}$ (л)-II	IA-AI-( $\overline{AI}$ )-H1,H2	Ц.м. есть	Ц.м. есть
33	2IxAA (л)-AA	AA-AA-(AA)-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$ ; $0 < i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
34	2IxAA (л)-AI	AA-AI-(AA)-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
35	2IxAA (л)-IA	IA-AA-(AA)-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. есть
36	2IxAA (л)-II	IA-AA-(AA)-H1,H2	Ц.м. есть	Ц.м. нет

Окончание таблицы 4.

1	2	3	4	5
37	2IxII(л)-AA	AA-AA-(II)-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$ ; $0 < i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
38	2IxII(л)-AI	AA-AI-(II)-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
39	2IxII(л)-IA	IA-AA-(II)-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. есть
40	2IxII(л)-II	IA-AA-(II)-H1,H2	Ц.м. есть	Ц.м. нет
41	2IxIA(л)-AA	AA-AA-(IA)-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$ ; $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
42	2IxIA(л)-AI	AA-AI-(IA)-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
43	2IxIA(л)-IA	IA-AA-(IA)-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет
44	2IxIA(л)-II	IA-AA-(IA)-H1,H2	Ц.м. есть	Ц.м. есть
45	2Ix $\overline{IA}$ (л)-AA	AA-AA-( $\overline{IA}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$ ; $i_{\Sigma H_2}^{(I0)} < 0$	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$
46	2Ix $\overline{IA}$ (л)-AI	AA-AI-( $\overline{IA}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$	Ц.м. нет при $0 < i_{1H_1}^{(\ominus)} < 1$
47	2Ix $\overline{IA}$ (л)-IA	AA-AI-( $\overline{IA}$ )-H1,H2	Ц.м. нет при $i_{1H_1}^{(\ominus)} < 0$	Ц.м. нет
48	2Ix $\overline{IA}$ (л)-II	IA-AA-( $\overline{IA}$ )-H1,H2	Ц.м. есть	Ц.м. есть

Таблица 4 позволяет выбрать для редукции или мультипликации рациональный аналог парно-планетарного механизма. Среди рациональных аналогов наибольшие передаточные отношения имеют механизмы AI-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>; AI-AA-( $\overline{AI}$ )-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>; AI-AA-(IA)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>; AA-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>; AA-AA-(AI)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>; AA-AA-(IA)-H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>.

**Парно-планетарные механизмы с правым блоком парного сателлита в виде сателлитного планетарного механизма.**

Поменяем в парном сателлите механизма 2АхАІ(л)-АА (рис. 2, а) левый и правый блоки местами, получили механизм 2АхАІ(п)-АА (рис. 3).

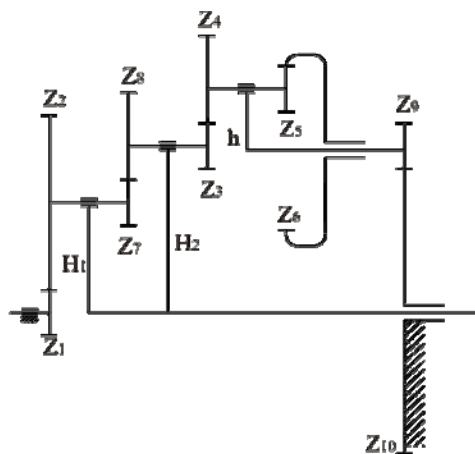


Рис. 3. Механизм 2АхАІ(п)-АА

Выражение общего передаточного отношения  $i_{IH}$  имеет вид

$$i_{IH} = 1 - i_{1,10}^{(H)} = 1 - i_{12}^{(H)} i_{78}^{(H)} i_{3h}^{(6)} i_{9,10}^{(H)} = 1 + \frac{z_2 z_8}{z_1 z_7} \left( 1 + \frac{z_4 z_6}{z_3 z_5} \right) \frac{z_{10}}{z_9} = 1 + \frac{z_2 z_8 z_{10}}{z_1 z_7 z_9} + \frac{z_2 z_8 z_4 z_6 z_{10}}{z_1 z_7 z_3 z_5 z_9}. \quad (7)$$

Сравнение (4) и (7) указывает на справедливость заключения о том, что передаточное отношение парно-планетарного механизма с одним сателлитным планетарным механизмом не зависит от его расположения в блоках парного сателлита. Соответственно и структура аналога парно-планетарного механизма по общему передаточному отношению механизма 2АхАІ(л)-АА может быть принята и для механизма 2АхАІ(п)-АА. Выражения для определения относительных угловых скоростей сателлитов и переборов механизмов 2АхАІ(п)-АА и АІ-АА-(АІ)-Н1,Н2, представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Относительные угловые скорости сателлитов и переборов

Механизм 2АхАІ(п)-АА	механизм АІ-АА-(АІ)-Н1,Н2
$\omega_{2H} = -i_{78}^{(H)} i_{8h}^{(6)} i_{9,10}^{(H)} \omega_H =$ $= -\left( 1 + \frac{z_4 z_6}{z_3 z_5} \right) \frac{z_8 z_{10}}{z_7 z_9} \omega_H$	$\omega_{2H} = i_{23}^{(H)} i_{3,10}^{(H)} (i_{36} - 1) \omega_H =$ $= -\frac{z_8 z_{10}}{z_7 z_9} \left( 1 + \frac{z_4 z_6}{z_3 z_5} \right) \omega_H$
$\omega_{4h} = i_{46}^h i_{9,10}^{(H)} \omega_H = -\frac{z_6 z_{10}}{z_5 z_9} \omega_H$	$\omega_5 = i_{56} \omega_H = \frac{z_6}{z_5} \omega_H$
$\omega_{8,H_2} = -i_{3h}^{(H_2)} i_{9,10}^{(H)} \omega_H =$ $= \left( 1 + \frac{z_4 z_6}{z_3 z_5} \right) \frac{z_{10}}{z_9} \omega_H$	$\omega_{8,H_2} = i_{8,10}^{(H_2)} (i_{36} - 1) \omega_H =$ $= \frac{z_{10}}{z_9} \left( 1 + \frac{z_4 z_6}{z_3 z_5} \right) \omega_H$

**Выводы.** Установлено, что зубчатые бипланетарные и парно-планетарные механизмы с одним сателлитным планетарным механизмом имеют аналоги по общему передаточному отношению в виде зубчатых замкнутых планетарных механизмов различной структуры. Аналоги бипланетарных механизмов одноконтурные, парно-планетарных – двухконтурные. Показано, что аналоги имеют более простые кинематические схемы, чем оригиналы, в замкнутых контурах многих аналогов отсутствуют циркулирующие мощности, в более благоприятных условиях работают подшипники сателлитов и переборов. Достоинства аналогов позволяют рекомендовать их для применения в авиационных устройствах.

В статье приведены возможные аналоги бипланетарных и парно-планетарных зубчатых механизмов с установлением их рациональности.

**Список литературы:** 1. Ткаченко В.А. Об аналогии планетарных механизмов с парными сателлитами замкнутым планетарным механизмом // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ, 2000. – Вып. 109. С.43–48. 2. Ткаченко В.А. Планетарные механизмы. Оптимальное проектирование. – Харьков: «ХАИ», 2005. – 445с. 3. Ткаченко В.А., Шебанов И.Г. К проектированию рациональных зубчатых планетарных механизмов с парными сателлитами // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ, 2000. – Вып. 109. – С.49–55. 4. Цыплаков Ю.С. Бипланетарные механизмы. – М.: Машиностроение, 1956. – 95с. 5. Шебанов И.Г. Определение циркулирующей мощности в замкнутых планетарных и дифференциальных зубчатых механизмах методом Н.Е.Жуковского // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2001. – Вып. 12. – С.117–125.

Поступила в редакцию 29.05.08